

Garnet film을 이용한 광전류 센서 구현

正會員 曹洪根*, 金永洙**, 鄭成鍾***

The Implementation of Optical Current Sensor Utilizing a Garnet film

Hong Keun Cho*, Young Soo Kim**, Seong Jong Chung*** Regular Members

要 約

광센서는 전자 유도 간섭을 받지 않는 특성으로 인하여 대전력 송전에 있어서 전류 측정에 적합한 센서로 기대되고 있다. 파라데이 효과를 이용하는 자계 광학 센서는 이미 수년전 부터 많이 연구되어 왔으나, 본 논문에서는 파라데이 회전각 이 매우 큰 특성을 갖는 희토류 철 Garnet($(\text{RBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) 물질을 film 형태로 사용하여 대전류는 물론 비교적 적은 전류(0 - 50A정도)에 대해서도 좋은 특성을 갖는 센서를 구현하고, 특성시험을 수행한 결과 -40°C 에서 60°C 범위 내에서 전류센서의 출력변동 $\pm 1\%$ 이내임을 확인 하였다.

ABSTRACT

Due to their favourable characteristics of immunity to electro-magnetic interference, magneto-optic sensors are expected very ideal candidates for current measurements in high power electric transmission systems. Sensors utilizing the magneto-optic Faraday effect have been investigated for a number of years. When looking for a comparably low current (0-50A) measurement design, magneto-optical garnet materials such as Rare-earth Iron Garnet($(\text{RBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) used as film types have shown promising properties. The sensor output variations were measured to be within ± 1 percent under the temperature range of -40° to 60° at the performance test.

*전력연구원 (KEPRI)

Korea Electric Power Research Institute

**한국전기연구소 (KERI)

Korea Electrotechnology Research Institute

***전북대학교 컴퓨터공학과

Dept. of Computer Engineering, Chonbuk National Univ.

論文番號 : 95137-0406

接受日字 : 1995年 4月 6日

I. 서론

최근 산업의 고도 성장과 더불어 전력수요가 급격히 증가하면서 전력설비의 초고압화 및 대용량화가 요구되고 전력의 안정적인 공급 및 효율적인 이용이 요구되고 있다. 특히 전력 생산설비인 발전계통으로부터 배전계통이나 수용가에 이르기까지 계측, 제어, 보호기술의 고도화를 이루기 위해서 기존 전자식 센서 기술을 적용하기에는 한계가 있다.⁽¹⁾ 그 이유는 고전압이나 대전력 환경에서는 각종 임펄스성 전압, 전류 그리고 자연계의 기상 현상에 기인한 뇌서지 등이 직접경로를 통해서나 간접적인 정전유도나 전자유도에 의해서 각종 발변전소의 계측, 제어장치에 영향을 주기 때문이다.⁽²⁾ 이러한 문제를 해결할 수 있는 기술로서 최근 각광을 받는 것이 광센서 기술이다. 광센서기술은 광통신이 실용화 되면서 주목을 받기 시작한 기술로서 광이 지나는 특징, 즉 광대역, 저손실, 방폭성, 고절연성, 무유도성, 세심, 경량성, 보수용이성, 광응용 기술과의 정합성등 전력기에 적용하기에 적합한 기술로 평가되어 왔다. 최근에는 모든 센서를 광센서로 대체하려는 연구가 시도되고 있으며 최종적으로 센서에서 전송, 처리를 모두 광으로 실현하는 종합 광계측 기술 구현이 가능하게 되고, 종래의 기술로서는 실현 불가능했던 영역에까지 계측기술의 발전이 가능하게 되었다.

광CT(Current Transducer)의 원리는 이미 널리 알려져 있는 것이지만 이 원리를 적용하기에는 광센서 소자 및 광학 부품기술의 미흡으로 실용화 되지 못하고 극히 일부에서만 제한적으로 연구가 진행되어 왔다. 그러나 광통신 기술이 실용화 되면서 광센서 응용기술도 활발히 추진되어 일부 광센서는 이미 개발되어 실용화 시험중인 것도 있다. 그 중에서도 국내외의 전력회사들이 가장 관심을 갖고 개발하고자 하는 것이 광CT이다. 광CT는 고압부에 능동소자, 전원등이 포함되지 않기 때문에 구성이 간단하고 신뢰성이 높고 전기적 절연성능이 우수하고, 전자유도 장애를 받지않는 계측 시스템을 구축할 수 있다. 현재 운용중인 전력용 전류 측정 수단과 비교하여 보면, 교류 대전류 측정에 사용되는 계기용 변류기의 경우 철심의 전자유도를 이용하는 것으로 구조도 견고하고 신뢰성, 주파수 특성도 양호한 편이나 전력수요가 증가함에 따라 점차 대형화 되어 가고 있다. 재래의 CT 제작 기술에서는 철심과 권선 형태의 구조물로 교류

전류를 변류하여 계측하기 때문에 먼지나 소금기 등에 의한 오염을 고려 거대한 부싱에관이 필요하게 되어 절연비용이 커지게 되고, 고장시 대전류에 의해 철심이 포화되는 현상으로 구조상 Micro초급의 펄스전류 측정은 불가능하다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 광CT는 이러한 문제들을 해결할 수 있고 비접촉으로 고압부의 전류를 광의 강약으로 변환하여 계측하기 때문에 절연문제가 쉽게 해결되며 Nano초급의 전류파형에 대해서도 재현성이 우수하므로 점차 이에 대한 관심이 높아지고 있는 시점에서 본연구에서는 광전류 센서를 구현하고 이를 전력설비 현장에 설치 시험하여 그 특성을 분석하였다.

II. 광전류 센서 설계

1. Garnet($R_3Fe_5O_{12}$) 센서의 자기광학 특성

희토류 철 Garnet의 파라데이 회전각(θ_F)은 그림1과 같이 포화 자계(M_s)까지는 외부자계의 강도에 비례한다. 포화 자계 이상에서는 출력이 일정하나 측정하고자 하는 전류량에 맞추어 적당히 조정하면 선형성이 좋은 부분에서 사용 가능하다.

전류 센서는 대체로 전력선에 직접 부착되어 옥외에서 사용되므로 온도 특성이 우수해야 하는데, 그러기 위해서는 철 Garnet 희토류의 일부를 Bi로 치환하는 것이 실용적이다. ($(R_{Bi})_3Fe_5O_{12}$) 즉, 이 센서는 Verdet 정

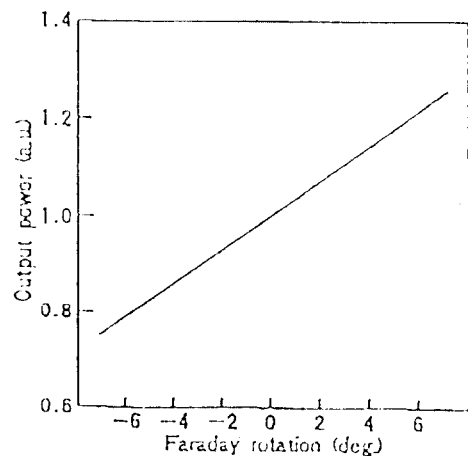


그림 1. 희토류 철 Garnet의 파라데이 회전각
Fig. 1. Faraday rotation of rare-earth garnet depends on magnetic field

수의 온도 특성(θ_F/M_s)이 우수한 것이 요구된다. 희토류 철 Garnet (희토류를 일부 Bi로 치환한 것)의 파라데이 회전, 포화 자속 및 그것의 온도 특성은 아래의 계수로서 표시된다.

$$M_s(T) = |M_d(T) - M_a(T) - M_c(T)| \quad (1)$$

$$\theta_F = D \cdot M_d(T) - A \cdot M_a(T) - C \cdot M_c(T) \quad (2)$$

여기서 $M_a(T)$, $M_d(T)$, $M_c(T)$ 는 여러가지 Garnet 중에 8면체 형의 Fe, 4면체 형의 Fe, 12면체 형의 희토류 부격자 자화를 나타낸다. A, D, C는 Garnet의 조성과 입사되는 광의 파장에 의해 결정되는 정수이다. 즉, 식1과 식2를 이용하여 실온 부근에서 θ_F/M_s 의 온도 변화가 작은 (RBi)₃Fe₅O₁₂의 희토류 조성을 결정할 수 있다. 그러나 복수의 희토류나 Bi가 복잡하게 구성될 때는 식2에서 A, D, C의 값을 구하기가 곤란하다. 이러한 원리를 토대로 자계 센서용 Garnet를 개발하는 기본 지침을 다음과 같이 정리할 수 있다.

① Bi가 1(atoms/f.u.)이상일 경우 파라데이 회전과 그 온도 변화는 원래의 희토류 종류에 관계없이 일정하고 실온 부근에서 약 -0.13%/°C의 온도 계수를 가진다.

② R₃Fe₅O₁₂의 포화 자계의 온도 변화는 희토류의 종류와 비슷하게 많이 변한다. 실온 부근에서의 온도계수는 표1과 같다.

③ 이러한 사실로부터 적당한 종류의 희토류를 조합하여 실온 부근에서 θ_F/M_s 의 온도 변화를 작도록, 즉 실온에서 M_s 의 온도계수가 θ_F 의 온도계수와 같도록하여 (RBi)₃Fe₅O₁₂의 조성을 실험적으로 구한다. 구체적으로는 θ_F/M_s 의 온도계수가 정(+)인 Y, Lu, Eu, Er

과 부(-)인 Ho, Dy, Tb, Gd를 적당히 조합하여 온도 변화를 측정하여 최적의 조건을 찾는다.

위에서 검토한 바와 같은 조건으로 조성된 희토류 철 Garnet 자계센서의 Verdet 정수는 BSO의 약 4배 정도이고, 온도 특성은 비슷하거나 우수한 편으로 비교적 저전류의 측정에 적합하다.⁽⁵⁾

센서의 구성은 Garnet 센서가 선광성을 가지고 있지 않으므로 광학 바이어스를 잡아주기 위해서는 광축과 검광자의 방향을 45°로 하여야 하는데, 그 방법으로는 검광자를 45° 회전시켜 구성하거나, 선광성을 가지는 다른 결정을 광로 내부에 두어 그 효과를 얻는 방법이 있다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 후자의 방법으로 구성된 저전류 검출용 광자계 센서를 그림2에 보인다. 발광다이오드에서 오는 랜덤한 광이 Rod Lens 1을 통과한 후 평행광으로 되고 선형 편광자를 통과하여 선형편광이 된다. 이 형 편광된 광이 45도 회전자를 통과하면 검광자와 45도의 각을 이루게 되어 광학 바이어스가 형성된다. 여기에 교류 전류를 흘리면 Garnet 결정이 파라데이 효과에 의하여 편광면이 회전하고, 이 변화된 편광광이 검광자를 통과하면 빛의 강도가 변화된다. 이 빛을 Rod Lens 2를 이용하여 집광하고, 광 케이블을 통하여 신호 처리단으로 보내어진 빛을 신호처리하여 전류를 측정한다.

III. 광신호처리 설계

초기증폭단의 출력신호 형태는 포토다이오드에서 수광된 직류성분의 광량에 진폭변조된 신호의 형태로 나타난다. 즉, 어느 일정한 직류성분에 전류나 전압에 의해 변조된 신호만큼 실려 있는 상태이다. 이것을 수식으로 표현해 보면 다음과 같다.

표 1. 희토류 Garnet 결정의 온도계수
Table 1. Temperature coefficients of M_s (TCM) for rare-earth iron garnet crystal

R	TCH	R	TCH
Y	~-0.22%/°C	Ho	~-0.02%/°C
(Bi)	~-0.2	Dy	~+0.65
Lu	~-0.19	Tb	~+2.27
Eu	~-0.2	Gd	~+4.6
Er	~-0.21		

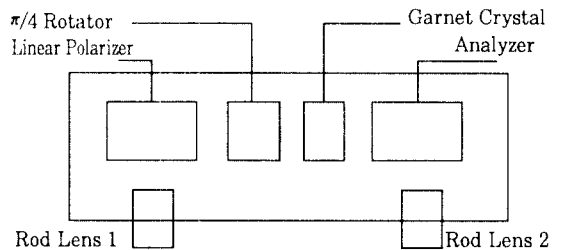


그림 2. 광자계 센서
Fig. 2. Optical magnetic field sensor

$$P = P_0(1 + m) = P_0 + mP_0 \quad (3)$$

\uparrow \uparrow
 직류성분 교류성분(신호값)

여기서 P_0 는 포토다이오드에 수광된 직류성분의 값이고 m 은 전류나 전압에 변조된 값 즉, 변조도(modulation depth)라 한다. 그런데 어떤 외부적인 요인이나 시스템 제조과정에서의 차이에 의해 P_0 의 값이 변할 경우에 신호의 진폭도 같이 변하게 되어 신호의 절대값 m 을 읽기가 곤란하게된다. 이러한 문제점을 해결하는 방안으로 교류성분을 직류성분으로 나눔으로 순수한 m 값만을 검출할 수 있다. 이러한 신호처리 기법을 블럭다이아그램으로 그려보면 그림3과 같이 되며, 그림4는 나누기를 행하지 않았을 경우 수광소자에 입력광량의 변화에

따른 신호값의 변동을 실험한 결과를 그래프로 그린것으로 그림5의 나누기를 하였을때의 그것과 비교하면 광량의 변화에 따라 심한변동이 나타남을 알 수 있다.

(1) AC/DC 분리

직류와 교류가 같이 실려있는 신호에서 교류성분만 통과시키는 것은 간단한 고역 통과 필터로서 가능하나 직류성분만을 검출하는 방법은 다음 그림6과 같은 방법으로 가능하다.

(2) AC,DC 증폭단 및 Divider

교류와 직류값을 신호의 진폭에 따라 알맞게 증폭 할 필요가 있는데 본 연구에서는 각각 따로 증폭하는 대신에 초기증폭단의 출력에서 검출된 직류성분의 레벨을 비

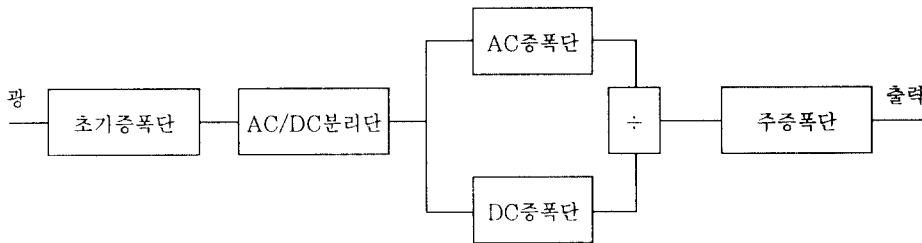


그림 3. 신호처리의 블럭다이아그램
 Fig. 3. Block diagram of signal processing

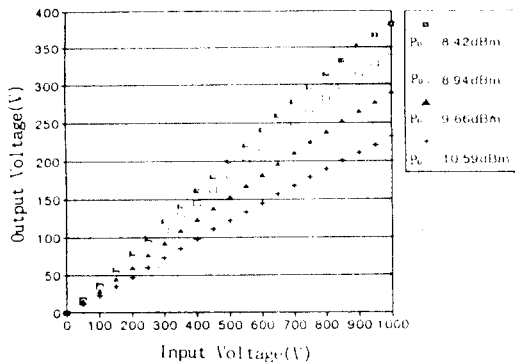


그림 4. 입력 광량에 따른 신호레벨의 변화(나눔을 하지 않았을 경우)
 Fig. 4. Variation of signal levels with different input power (common case)

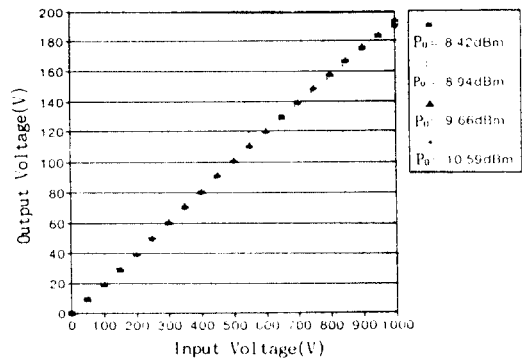


그림 5. 입력 광량에 따른 신호레벨의 변화(나눔을 하였을 경우)
 Fig. 5. Variation of signal levels with different input power (divided case)

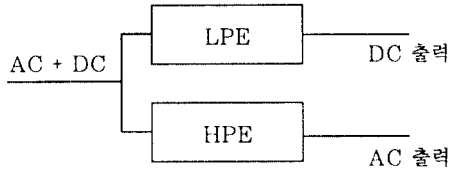


그림 6. 직류성분 검출방법
Fig. 6. Detecting technique of DC signal

례적으로 조정하여 결국 교류성분에 대한 직류성분의 비로 나타나는 신호는 증폭된 것과 같은 효과를 얻는 방법을 사용하였다. 그리고 입력된 교류와 직류 신호에 따라 최대 0.8%의 오차로 나누기를 행하는 소자인 AD534를 이용하여 순수한 신호만을 검출하였다. 이 소자는 기본적으로 나누어진 값에서 10배를 출력으로 나타냄으로 결과적으로는 신호처리부의 중간 증폭 기능도 포함하는 효과를 가진다. 이 소자의 입력 특성은 최소 분포 전압 레벨은 0.1V이며, 최대 분자의 전압레벨은 ±10V로 그 사용 범위가 넓어 매우 편리하다.

그리고 소자의 외부에서 저항과 같은 수동소자로 별도의 조정이 필요없이 직접 신호를 입력하므로 오차를 최소화 할 수 있다.

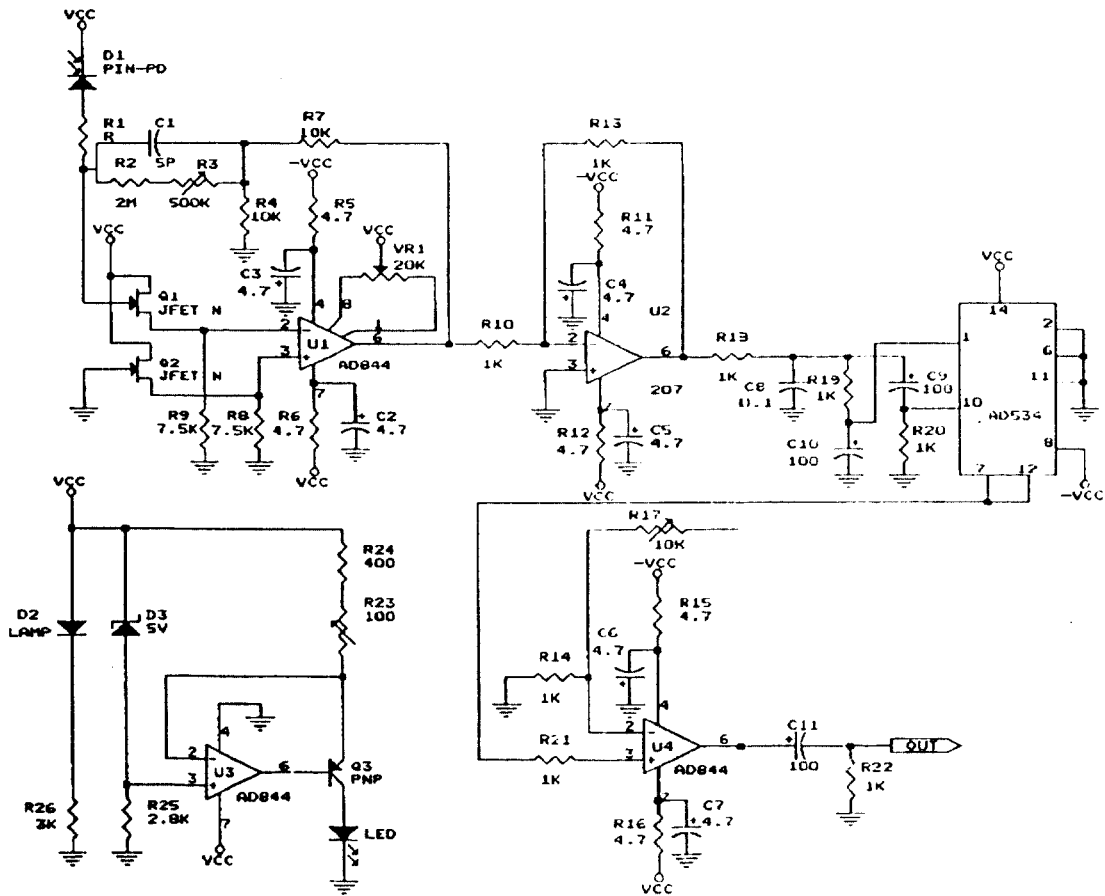


그림 7. 신호처리부의 전체 회로도
Fig. 7. circuit diagram of signal processing unit

(3) 주 증폭단

앞에서 설명한 일련의 과정을 거친 신호는 수광되는 광량의 변화에도 그 출력신호의 값은 변화가 거의 없이 안정한 값을 유지하게 되는데 실험에서도 확인 할 수 있었다. 실험 결과 입력광량이 0.5 μ W이하에서는 신호레벨이 너무 작아 잡음이나 수광소자의 효율저하로 인한 출력의 변동이 생겨 안정감을 얻을 수 없었다. 따라서 최소 0.5 μ W이상의 광량만 입력되면 신호의 변동이 없이 안정을 얻을 수 있다.

이렇게 얻어진 신호를 최종 증폭하여 측정하고자 하는 전류나 전압의 값과 결합시켜 A/D변환 하여 나타냈을 때 그 값을 바로 알 수 있도록 정확하게 미세 조정하는 것이 주 증폭단의 기능이다. 지금까지 설명한 모든 기능들을 가지는 회로를 하나의 PCB로 제작하여 사용하였으며 전체회로도에는 그림7과 같다.

IV. 시험 및 분석

그림2와 같은 저전류용 광자계 센서를 설계하여 표준 전류원(YEW-2558)으로 전류를 공급하고 자계센서의 입출력 특성을 조사하였다. Garnet 결정의 Verdet 정수가 크기때문에 저전류에서도 양호한 출력이 얻어짐을 알 수 있다. 표2는 입력전류를 0 암페어부터 50 암페어까지 변화시키면서 센서의 입출력 특성을 조사한 것이다. 그림8은 광자계센서의 입출력 특성을 그래프로 나타낸 것을 보여준다. 그림9는 154kv 전력선에 설치된 광

CT로부터 얻어진 전류파형과 기존 설치된 CT의 출력 파형을 비교하기 위하여 동시에 측정한 것으로 전류의 파형 재현성이 양호함을 알 수 있다. 한편 설계된 광자계 센서의 온도변화에 대한 감도 변화량을 알아보기 위하여 항온조 내부에 광자계 센서를 두고 20 암페어의 전류를 흘려주면서 온도를 20도~60도~-40도~20도까지 한 주기동안 변화 시키면서 출력의 변화량을 조사한 결과 표3 및 그림10에서 볼 수 있는 바와 같이 입력 전류에 대한 센서의 출력 변화량이 $\pm 1\%$ 이내임을 확인하였다.

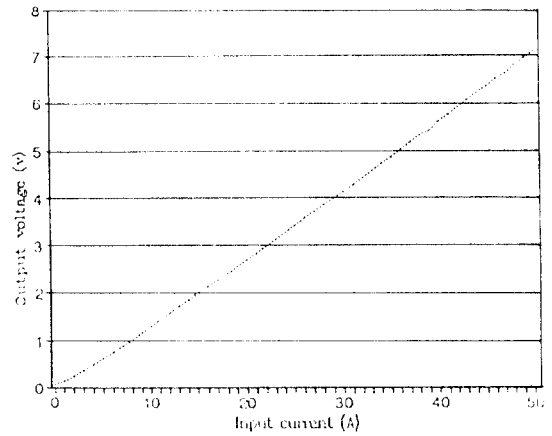


그림 8. 광자계 센서의 입출력 특성그래프
Fig. 8. Graph of input-output characteristics of optical CT

표 2 저전류 센서의 입출력 특성
Table 2 Input-output characteristics of the sensor for low current

입력전류(Irms)	출력전압(Vrms)	입력전류(Irms)	출력전압(Vrms)
0	0.077	26	3.578
2	0.244	28	3.862
4	0.498	30	4.150
6	0.759	32	4.443
8	1.029	34	4.738
10	1.303	36	5.028
12	1.580	38	5.328
14	1.859	40	5.633
16	2.142	42	5.924
18	2.421	44	6.223
20	2.710	46	6.525
22	2.997	48	6.825
24	3.284	50	7.128

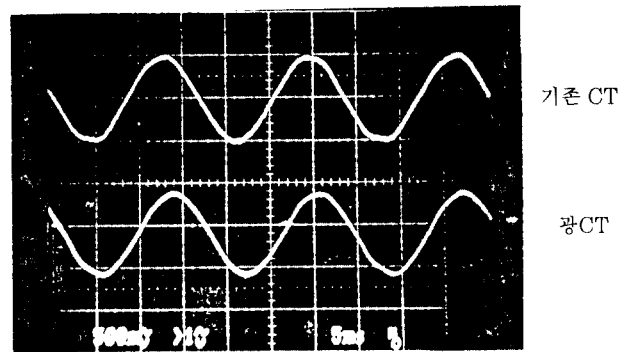


그림 9. 기존 CT와 광CT의 출력파형 비교
Fig. 9. Comparison of output waveform of Optical CT and conventional CT

표 3. 광자계 센서의 온도변화에 의한 감도 변화특성
Table 3. Sensitivity variation occurred by temperature change of the magnetic field sensor

온도	출력전압	온도	출력전압	온도	출력전압
20	2.834	32	2.857	-36	2.830
24	2.842	28	2.858	-40	2.828
28	2.845	24	2.873	-36	2.826
32	2.833	20	2.854	-32	2.826
36	2.827	16	2.868	-28	2.810
40	2.855	12	2.855	-24	2.830
44	2.852	8	2.853	-20	2.815
48	2.848	4	2.860	-16	2.823
52	2.855	0	2.856	-12	2.824
56	2.864	-4	2.847	-8	2.824
60	2.876	-8	2.839	-4	2.843
56	2.866	-12	2.863	0	2.824
52	2.888	-16	2.856	4	2.817
48	2.906	-20	2.863	8	2.812
44	2.844	-24	2.876	12	2.822
40	2.882	-28	2.854	16	2.826
36	2.866	-32	2.846	20	2.822

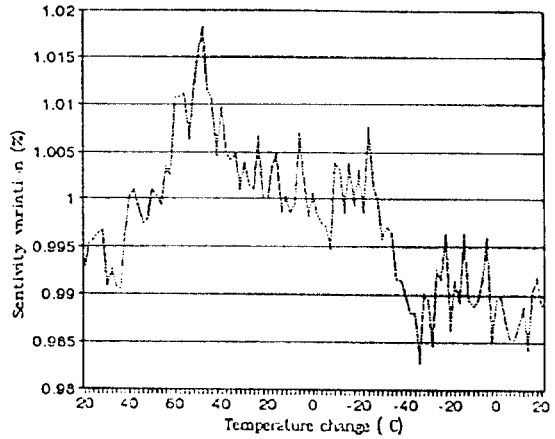


그림 10. 광 CT의 온도특성 그래프
Fig. 10. Sensitivity variation of optical CT depends on temperature

V. 결 론

본 연구에서는 광CT의 구현을 위하여 Garnet film을 사용하는 광자계 센서를 설계 제작하여 전력선에 직접 설치하고 그 특성을 시험하였다. 측정대상인 전력선의 상시 부하전류가 수십 암페어 정도로 비교적 적은 전류로서, 1차 설계된 광CT로서는 계측이 불가능하여 2차로 Verdet 상수가 큰 Garnet결정을 이용하여 광센서를 설계 시험한 결과 선형 특성이 우수하고, 파라데이 회전각이 커서 비교적 적은량의 전류에도 응답 특성이 양호함을 알 수 있었다. 온도 변화 특성 즉, -40°C에서 +60°C 까지의 온도 변화에 대한 전류센서의 출력 변동은 ±1% 이내임을 확인하였고, 신호 처리부에서는 포토 다이오드에 수광된 직류성분의 광량에 진폭변조된 신호의 형태로 나타나는 변조도의 불균일성을 제거하기 위해 교류성분을 직류성분으로 나누는 기법을 사용하여 비교 분석하여 본 결과 센싱 출력의 안정성이 향상됨을 알게 되었다. 본 연구 결과는 전류 계측 및 제어를 위한 광전류 변성 시스템 설계시 센서 구성과 광신호처리의 효과적인 방법으로 고려될 수 있으며, 전력선의 전류 계측, 감시에 활용 될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. T.W.Cease, Paul Johnston "A Magneto-Optic Transducer" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April, 1990.
2. Edward F. Kelly, Robert E. Hebner, "Electro-Optic Measurement of the Electric Field Distribution in Transformer Oil" IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-102, No. 7, July, 1983.
3. J. G. Kappenman, "Current Transformer and Relay Performance in the Presence of Geomagnetically-Induced Currents" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, March, 1981.
4. M. Miyauchi and M. Kuribara, "Development of distribution automation system using advanced information technology(part II) : Development of optical voltage sensor and current sensor for distribution system" Elec. Eng. Lab. Rep.

5. Kazuho Yamada, Tetsuro Baba, "Highly Reliable Optical Isolator Using Inorganic Materials" Tokin Technical Review, 1989.

6. Amnon Yariv, Pochi Yeh, "Optical Waves in

Crystals" John Wiley & Sons, 1984.

7. 김요희, "전력용 광계측 시스템 개발연구 III" 과학기술처 연구 보고서, 1989.



曹 洪 根(Hong Keun Cho) 정회원

1952년 10월 3일생
 1975년 2월 : 항공대학교 통신공학과(공학사)
 1993년 2월 : 충남대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1995년 8월 : 전북대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정 수료

1979년 8월~현재 : 전력연구원(KEPRI) 선임연구원
 ※주관심 분야 : 광전자 응용, 컴퓨터 네트워크, WDM 네트워크



金 永 洙(Young Soo Kim) 정회원

1959년 1월 4일생
 1982년 2월 : 전북대학교 전자공학과(공학사)
 1984년 2월 : 전북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1994년 2월 : 전북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1984년 3월~현재 : 한국전기연구소(KERI) 선임연구원
 ※주관심 분야 : 광섬유센서, 광센서 네트워크 등



鄭 成 鍾(Seong Jong Chung) 정회원

1975년 2월 : 한양대학교 전기공학과(공학사)
 1979년~1982년 : Houston 대학교 전자공학과 공학석사
 1982년~1984년 : Houston 대학교 전자공학과 박사과정 수료

1986년~1989년 : 충남대학교 전자계산기공학과(공학박사)
 1991년~1992년 : Pennsylvania State University Post Doctor

1985년~현재 : 전북대학교 공대 컴퓨터공학과 부교수
 ※주관심 분야 : 그래픽스, 문자인식, 컴퓨터 응용